

Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie,
optisches System, Herstellverfahren eines
Mikrolithographie-Projektionsobjektivs und
mikrolithographisches Strukturierverfahren

05 =====

Die Erfindung betrifft eine Projektionsbelichtungsanlage
der Mikrolithographie nach dem Oberbegriff der Ansprüche
1 und 41, ein optisches System, insbesondere ein mikro-
10 lithographisches Projektionsobjektiv, nach dem Oberbegriff
der Ansprüche 9 und 12, ein Herstellverfahren eines Mikro-
lithographie-Projektionsobjektivs nach dem Oberbegriff
des Anspruch 42 sowie ein mikrolithographisches Strukturier-
verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 44.

15

Die Patentanmeldung PCT/EP00/13184 zeigt für derartige
vom Markt her bekannte Projektionsbelichtungsanlagen
geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektions-
objektive mit numerischen Aperturen von 0,8 und 0,9 bei
20 einer Betriebswellenlänge bei 157nm.

Aus der DE 198 07 120 A (US Ser. No. 09/252 636) ist
der Einsatz von lokal in der Dicke variierenden doppel-
brechenden Elementen zum Ausgleich von über ein Lichtbün-
25 del variierenden Polarisationsseffekten bekannt.

Die US 6 201 634 B beschreibt, daß für diesen Einsatz
geeignete technische Fluoridkristalle Spannungsdoppel-
brechung aufweisen, die bezogen auf die Kristallachsen
30 Richtungsabhängigkeit zeigt.

Aus der Internet-Publikation "Preliminary Determination
of an Intrinsic Birefringence in CaF_2 " von John H. Burnett,
Eric L. Shirley und Zachary H. Lewin, NIST Gaithersburg MD
35 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist bekannt, daß

Kalziumfluorid-Einkristalle außer spannungsinduzierter auch intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

Alle zitierten Schriften sollen in vollem Umfang auch
05 Teil der Offenbarung dieser Anmeldung sein.

Erheblich sind diese Doppelbrechungseffekte erst bei den niedrigen Wellenlängen unterhalb etwa 200 nm, also insbesondere bei 193 nm und verstärkt bei 157 nm, den
10 für die hochauflösende Mikrolithographie bevorzugten Wellenlängen.

Da diese Doppelbrechung von der Lichtstrahlrichtung bezogen auf die Kristallachsen abhängig ist, ergibt
15 sich eine Variation als Funktion sowohl des Öffnungswinkels wie auch des Drehwinkels (Azimutwinkels) um die optische Achse.

Für ein optisches Element, insbesondere eine Linse (das
20 jedoch auch als Planplatte, z. B. Abschlußplatte, Filter, ausgebildet sein kann), das rotationssymmetrisch um die (111) Kristallachse orientiert ist, ist die Doppelbrechung bei senkrechtem Durchtritt eines Lichtstrahls minimal. Unter einem Öffnungswinkel von ca. 35° und unter drei
25 gegeneinander um 120° verdrehten Drehwinkeln (Azimutwinkeln) ist die Einfallsrichtung jedoch äquivalent der (110) Orientierung des Kristalls, und es tritt maximale Doppelbrechung auf.

30 Bei einer Anordnung rotationssymmetrisch zu einer der (100), (010) oder (001) Achsen liegen unter einem Öffnungswinkel von 45° in jetzt vierzähliger Rotationssymmetrie wieder die (110) äquivalenten Achsen mit maximaler Doppelbrechung.

Nun ist bei einem Element aus CaF_2 , aus dem ein 157 nm Lichtstrahl mit der numerischen Apertur 0,8 austritt, der Öffnungswinkel im Durchtritt mit dem Brechungsindex von ca. 1,56 gleich 31 Grad; für $\text{NA} = 0,9$ ergibt sich ein Winkel von etwa 35 Grad. Die richtungsabhängige Doppelbrechung ist also bei so hoch geöffneten Systemen ein Problem.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Kompensation dieser Störung durch richtungsabhängige Doppelbrechung anzugeben, mit der auch höchstaperturige Projektionsobjektive optimal betrieben werden können.

Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Projektionsbelichtungsanlage nach den Ansprüchen 1 und 41, durch ein optisches System nach Anspruch 9 oder 12 sowie durch ein Herstellungsverfahren nach Anspruch 42 und ein mikrolithographisches Strukturierverfahren nach Anspruch 44.

Die Erfindung geht aus von der Erkenntnis, daß zum einen die Störung durch die Doppelbrechung bei dem Wert von ca. 6 nm pro cm bei einem in Frage kommenden Lichtweg von rund 10 cm in Linsen bei den hohen Winkeln überwiegend eine Phasenverschiebung von bis zu etwa $\lambda/4$ für zwei zueinander senkrecht polarisierte Strahlen darstellt, daß weiter die hohen Strahlwinkel in bildnahen (feldnahen) Elementen auftreten, deren Strahl-Winkel-Verteilungen in einer dazu fouriertransformierten Pupillenebene als Orts-Verteilungen vorliegen.

Damit kann überraschend die Störung durch ein ortsabhängig polarisationsdrehendes bzw. ortsabhängig unterschiedlich doppelbrechendes optisches Element (Korrekturelement) nahe einer Pupillenebene korrigiert werden. Solche Elemente und ihre Herstellung durch lokales Polieren, insbesondere

durch Ionenstrahlpolieren, sind wie oben angegeben aber bekannt und auch in diesem neuen Zusammenhang verfügbar.

Die Lage "nahe" einer Pupillenebene, vorzugsweise der Systemaperturebene, ist eine praktische Annäherung an die Lage, bei der hinreichend gut die örtliche Verteilung von Polarisierung und Phase am Korrekturlement in ihre Winkelverteilung am winkelabhängig doppelbrechenden Element transformiert wird. Dies ist insbesondere mit dem optischen Design des Projektionsobjektivs abzustimmen.

Neben diesem Ansatz der Ansprüche 1 und 9 ist es auch allein oder in Kombination damit (Ansprüche 13, 41) möglich, die Doppelbrechungseffekte mehrerer derartiger Elemente dadurch zu mindern, daß sie nach Anspruch 12 verdreht gegeneinander eingebaut werden.

Zwar ist es gängige Praxis, bei der Montage und Justage optischer Systeme exemplarspezifische Störungen gefasster Elemente durch Verdrehen gegeneinander zu kompensieren. Hier wird aber die durch die winkelabhängige Doppelbrechung aufgehobene Rotationssymmetrie durch eine vom optischen Design vorzugebende Relativdrehung berücksichtigt und die Störung vermindert.

Im Beispiel zweier gleich dicker, unter gleichen Winkeln durchlaufener Kalziumfluorid-Elemente in (111)-Orientierung wird man beide um 60° gegeneinander verdrehen, so daß gerade Maxima und Minima der jeweiligen Doppelbrechung überlagert werden, was den Effekt etwa halbiert. Eine zugehörige Korrekturplatte weist dann sechszählige Rotationssymmetrie auf.

Da sowohl die Störung als auch die erforderliche Form-

veränderung am Korrekturelement gering sind, ist es möglich, bei der Herstellung eines Projektionsobjektivs dieses zunächst vollständig aufzubauen und zu justieren und es dann gemäß Anspruch 41 zu vermessen und nachzubearbeiten. Intrinsische und exemplarspezifische Spannungsdoppelbrechungen können dann zugleich kompensiert werden.

Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche.

10

Die Ausführungsform nach Anspruch 8 sieht dabei im Projektionsobjektiv eine Umwandlung von radialer zu tangentialer Polarisierung mit einem optisch aktiven Element vor.

15 Neben der Bereitstellung einer geeigneten örtlichen Dickenverteilung kann eine gewünschte Kompensationswirkung des Korrekturelements auch durch eine Einbringung z. B. von Zug- oder Druckspannungen mittels einer Krafteinleitungseinrichtung gemäß Anspruch 14 und eine dadurch
20 gezielt hervorgerufene Spannungsdoppelbrechung erzeugt werden.

Der Einsatz mindestens eines Piezo-Aktuators gemäß Anspruch 15 führt zur Möglichkeit der präzisen Vorgabe
25 einer Amplitude für die Krafteinleitung. Alternativ zu Piezo-Aktuatoren können auch andere aktive Aktuatoren, z. B. pneumatische Aktuatoren, oder auch passive Manipulatoren, z. B. Einstellschrauben oder vorgespannte Federn, eingesetzt werden.

30

Bei einer Krafteinleitung über die Umfangsfläche des Korrekturelements gemäß Anspruch 16 kann die gesamte freie Apertur des Korrekturelements erhalten bleiben. Beim Einleiten mechanischer Kräfte in das Korrektur-
35 element ist es günstig, die Kräfte entlang einer neutralen

Faser bzw. einer neutralen Fläche des Korrekturelements einzuleiten, damit keine unerwünschte Deformationen des Korrekturelements induziert werden. In erster Näherung wird eine derartige Krafteinleitung dann erreicht, wenn
05 darauf geachtet wird, keine Durchbiegung des optischen Elements hervorzurufen.

Mit Hilfe einer Krafteinleitungseinrichtung gem. Anspruch 17 läßt sich eine definierte Krafteinleitung in Richtung
10 der neutralen Fläche des optischen Elements vorgeben.

Ein beweglicher Anlagekörper gem. Anspruch 18 gewährleistet eine nachträgliche Feinanpassung der Krafteinleitung.

15 Eine Feder gemäß Anspruch 19 verhindert ein Verkanten des Anlagekörpers bezüglich des Korrekturelements.

Ein alternativ oder zusätzlich vorsehbares Gelenk gem. Anspruch 20 verhindert ein Verkanten des Anlagekörpers
20 bezüglich des Korrekturelements, indem eine definierte Beweglichkeit des Anlagekörpers relativ zum Korrektur-
element geschaffen wird.

Ein Festkörpergelenk gemäß Anspruch 21 ist verschleißfrei
25 und bauklein herstellbar.

Mit Hilfe eines Anlagekörpers gem. Anspruch 22 läßt sich eine definierte Kraftverteilung in das Korrektur-
element einleiten. Hierbei läßt sich durch die Ausdehnung
30 bzw. den Versatz der Krafteinleitungsorte ein erster Freiheitsgrad für diese Verteilung vorgeben, wobei sich
über die absolut einzuleitende Anlagekraft ein zweiter Freiheitsgrad einstellen läßt.

35 Mit einem Anlagekörper gem. Anspruch 23 läßt sich eine

progressiv in Umfangsrichtung veränderliche Verteilung der Krafteinleitung realisieren.

Dies ist ebenso durch eine alternative oder zusätzliche
05 Ausführung des Anlagekörpers gem. Anspruch 24 möglich.

Die Ausbildung einer Krafteinleitungskomponente gem. Anspruch 25 bietet eine einfach zu realisierende Möglichkeit einer Krafteinleitung längs der neutralen Fläche
10 des Korrekturlements, da die über die beiden Krafteinleitungsorte einleitbaren Kräfte entsprechend aufeinander abgestimmt werden können.

Eine Anordnung der Krafteinleitungskörper gem. Anspruch
15 26 bietet die Möglichkeit der Feinanpassung der Kraftverteilung zwischen den beiden Krafteinleitungskörpern zur Erzeugung einer Gesamtkraft längs der neutralen Fläche des Korrekturlements.

Die Anordnung der Krafteinleitungskörper gem. Anspruch
20 27 ist einfach. Die Anpassung der Krafteinleitung zur Erzeugung einer Gesamtkraft längs der neutralen Fläche des Korrekturlements erfolgt hierbei durch die geometrische Auslegung der Hebelarme.

25 Die alternative Zuordnung der Aktuatoren gem. Anspruch 28 ermöglicht eine präzise Krafteinleitung.

Der Einsatz eines Aktuators gem. Anspruch 29 ermöglicht
30 eine in Richtung der optischen Achse des optischen Systems flach bauende Ausführung einer Krafteinleitungseinrichtung.

Mit Hilfe eines Krafteinleitungskörpers gem. Anspruch
35 30 läßt sich die Krafteinleitung über die Anordnung und

Auslegung der Krafteinleitungskomponente gezielt zur Erzeugung einer Gesamtkraft in Richtung der neutralen Fläche des Korrekturlements steuern.

- 05 Dies kann mittels eines Aktuators gem. Anspruch 31 besonders einfach erfolgen.

- Ein Ring gem. Anspruch 32 ist ein besonders einfacher Gegenstützkörper für eine Krafteinleitungseinrichtung, 10 die dann zudem als vom Korrekturlement selbst getragene Komponente ausgeführt werden kann. Alternativ oder zusätzlich kann ein Stützring, der das Korrekturlement umgibt, eingesetzt sein, an dem sich der auf das Korrekturlement wirkende Aktuator, der selbst nicht ringförmig ausgebildet 15 sein muß, abstützt. Die Verwendung derartiger Ringe ermöglicht zudem eine Krafteinleitungseinrichtung, bei der keine Lateralverschiebung des Korrekturlements bei der Krafteinleitung auftreten kann.
- 20 Aufgrund der bei statischer Krafteinleitung erforderlichen hohen statischen Kräfte ist eine Beschädigung des Korrekturlements nicht immer auszuschließen. Außerdem kann sich der Spannungszustand des Korrekturlements bei einer länger andauernden Krafteinleitung über die Zeit aufgrund 25 z.B. von Drifteffekten ändern. Diese Einschränkungen werden überwunden, wenn ein Korrekturlement gemäß dem Anspruch 33 eingesetzt wird. Bei dynamischer Krafteinleitung läßt sich kurzzeitig eine wesentlich höhere Spannungsdoppelbrechung ohne Zerstörungsgefahr erzeugen, als dies 30 bei einer statischen Krafteinleitung der Fall ist. Zudem läßt sich über die Amplitude der dynamischen Krafteinleitung der Wert der einzustellenden Korrekturwirkung ggf. feinfühlig nachstellen, wobei dies auch bei fertigem Projektionsobjektiv von außen erfolgen kann.

Mittels einer Krafteinleitungseinrichtung gemäß Anspruch 34 läßt sich eine mittlere Krafteinleitung erzielen, die derjenigen bei einer statischen Krafteinleitung vergleichbar ist.

05

Hierbei führt eine Krafteinleitungseinrichtung gemäß Anspruch 35 zu einer Maximierung der Korrekturwirkung bei gegebenem Krafteinsatz.

- 10 Eine Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 36 mit auf die Emission des Projektionslichtbündels zeitlich abgestimmter Krafteinleitung führt dazu, daß die Kompensation immer genau dann erreicht wird, wenn die Projektionsoptik mit Projektionslicht durchleuchtet
- 15 wird. Gleichzeitig ist die Belastung des Korrektorelements reduziert.

Eine Steuereinrichtung gemäß Anspruch 37 gewährleistet hierbei eine einfache zeitliche Abstimmung.

20

- Beim Einsatz einer Krafteinleitungseinrichtung gem. Anspruch 38 wird über das Schallwellenprofil ein Brechungsindexprofil erzeugt, welches eine ähnliche räumliche Verteilung wie das Schallwellenprofil aufweist. Die
- 25 Schallwellenprofile lassen sich analog zu optischen Wellenfronten in Zernike-Funktionen zerlegen. Somit können beliebige Superpositionen orthogonaler Basis-Zernike-Funktionen als Brechungsindexprofile erzeugt werden. Mit einer Anzahl N Aktuatoren lassen sich z.B. Korrekturprofile mit einer Zähligkeit von $N/2$ erzeugen. Hierdurch
- 30 können prinzipiell alle bekannten Abbildungsfehler reduziert werden.

- Eine stehende Schallwelle gem. Anspruch 39 führt zu
- 35 einer statischen Abbildungsfehlerkorrektur.

Alternativ kann gem. Anspruch 40 eine dynamische Abbildungsfehlerkorrektur erfolgen. Hierdurch ist es z. B. möglich, bei einem intermittierenden Projektionslichtbündel die Abbildungseigenschaften des Objektivs während der Projektion gezielt zu ändern, so daß zum Zeitpunkt der Beeinflussung des Lichtbündels durch das optische Element optimale Abbildungsbedingungen für die Projektion vorherrschen. Alternativ ist es möglich, durch die dynamische Abbildungsfehlerkorrektur gemäß Anspruch 40 auf der Zeitskala der Lichtbeaufschlagung eine langsam, z.B. in der Größenordnung von $1/100$ s, veränderbare Kraftverteilung im optischen Element zu erzeugen, um z.B. die Korrekturwirkung auf die eingesetzte Beleuchtungsverteilung oder auf die gerade abgebildete Retikelstruktur zu optimieren.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachstehend anhand der Zeichnung näher erläutert; es zeigen

- Figur 1 schematisch eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage, teilweise im Meridionalschnitt;
- Figur 2 ein optisches Korrekturelement, das zu demjenigen alternativ ist, welches in die Projektionsbelichtungsanlage nach Figur 1 integriert ist;
- Figur 3 einen Meridionalschnitt einer Hälfte eines weiteren alternativen optischen Korrekturelements;
- Figur 4 einen Detailausschnitt, der einen beweglichen Anlagekörper einer mit dem optischen Korrekturelement gem. Figur 3 zusammenwirkenden Krafteinleitungseinrichtung zeigt, der alternativ zum Anlagekörper gem. Figur 3 ist;

- Figur 5 eine zur Figur 3 ähnliche Darstellung eines optischen Korrekturlements mit einer alternativen Krafteinleitungseinrichtung;
- 05 Figur 6 eine Aufsicht auf die Ausführungsform gem. Figur 5;
- Figur 7 eine zu den Figuren 3 und 5 ähnliche Darstellung eines alternativen optischen Korrekturlements mit einer alternativen Krafteinleitungseinrichtung;
- 10
- Figur 8 eine Aufsicht auf die Ausführungsform gem. Figur 7; sowie
- 15
- Figuren Ausführungsvarianten von im Zusammenhang mit den 9 bis 12 oben dargestellten Krafteinleitungseinrichtungen verwendbaren Alternativen von Anlagekörpern.
- 20 Bezogen auf eine optische Achse 0 angeordnet, zeigt Figur 1 eine Lichtquelle 1, die vorzugsweise ein bei 157 nm oder 193 nm schmalbandig emittierender Laser ist. Deren Licht wird einem Beleuchtungssystem 2 zugeführt, das als Besonderheit Mittel 21 zur Erzeugung radialer Polarisation enthalten kann, wie sie aus DE 195 25 35 392 A1 bekannt sind. Damit wird ein mikrolithographisches Retikel 3 beleuchtet, das mit einem Retikel-Halte- und Positioniersystem 31 verbunden ist. Das folgende Projektionsobjektiv 4 bildet das Retikel 3 auf das in 30 der Bildebene angeordnete Objekt 5 - typisch den Wafer - ab. Das Objekt 5 ist mit einem Objekt-Halte- und Positioniersystem 51 versehen.
- Das Projektionsobjektiv 4 umfaßt eine Gruppe 41 mit 35 Linsen und bedarfsweise auch einem oder mehreren Spie-

geln, eine Pupillenebene bzw. Systemaperturbene P und zwischen dieser Ebene P und der Ebene des Objekts 5 Linsen 42, 43, deren Durchtrittswinkel α durch die bildseitige numerische Apertur NA des Projektionsobjek-
05 tivs geprägt ist.

Mindestens eine der Linsen 42, 43 besteht aus einem Material mit winkelabhängiger Doppelbrechung, beispielsweise Kalziumfluorid, dessen (111) Orientierung mit
10 der optischen Achse O zusammenfällt oder bis zu ca. 5° abweicht.

Sind beide gezeigten Linsen 42, 43 (natürlich sind in diesem Bereich überwiegend noch mehr Linsen erforderlich)
15 derartig, so werden sie vorzugsweise um den Azimutwinkel, also um die optische Achse O verdreht gegeneinander eingebaut.

Für jeden Lichtstrahl ist ein an einer der feldnahen Linsen
20 42, 43 auftretender Öffnungswinkel in der Nähe der Pupillenebene P zu einem Abstand von der optischen Achse O transformiert. Das dort erfindungsgemäß angeordnete Korrekturelement 44 aus doppelbrechendem, spannungsdoppelbrechendem oder optisch aktivem Material kann deshalb mit
25 einer vom Abstand zur optischen Achse O und mit dem Azimutwinkel variierenden Dicke und damit ortsabhängiger Polarisationsdrehung bzw. ortsabhängiger unterschiedlicher doppelbrechender Wirkung die winkelabhängige Doppelbrechung der Linsen 42, 43 kompensieren.

30 Die Mittel 21 und das Korrekturelement 44 können radiale Polarisation am Objekt 5 erzeugen, wobei im Sinne der Erfindung das Korrekturelement 44 zugleich die winkelabhängige Doppelbrechung kompensiert.

35

Hat das Projektionsobjektiv 4 weitere Pupillenebenen, was z.B. bei Ausführungen mit Zwischenbild der Fall ist, so kann ein Korrekturalelement auch dort angeordnet sein.

05

Sind die refraktiven Wirkungen des Dickenverlaufs des Korrekturalelements 44 störend, so kann mit aus der DE 198 07 120 A bekannten Kompensationsplatten aus nicht oder wenig doppelbrechendem Material ausgeglichen werden. Dazu können auch Linsenoberflächen z.B. durch Ionenstrahlätzen nachgeformt werden.

10

Der beschriebene Effekt der winkelabhängigen Doppelbrechung der Fluorid-Kristalle kann im optischen Design hochaperturiger Projektionsobjektive berücksichtigt werden. Dazu muß die Variation über den Azimutwinkel berücksichtigt werden. Das Korrekturalelement 44 kann dann vom Design in seiner Form bzw Wirkung vorgegeben werden.

15

Alternativ oder ergänzend kann aber auch die Störung der Abbildung durch die winkelabhängige Doppelbrechung gemessen und in eine Nachbearbeitung des bereitgestellten Korrekturalelements 44 umgesetzt werden. Damit kann zugleich eine exemplarspezifische Doppelbrechungsverteilung korrigiert werden.

20

Weitere Varianten optischer Korrekturalemente sind in den Figuren 2 bis 12 gezeigt. Komponenten, die denjenigen entsprechen, die schon unter Bezugnahme auf Figur 1 beschrieben wurden, tragen bei diesen weiteren Varianten jeweils um Einhundert erhöhte Bezugszeichen und werden nicht nochmals im einzelnen erläutert.

25

Figur 2 zeigt vergrößert ein alternatives Korrekturale-

30

Figur 2 zeigt vergrößert ein alternatives Korrekturale-

35

- ment 144 in demontiertem, also nicht in ein Projektionsobjektiv integriertem Zustand in Aufsicht. Das Korrekturelement 144 ist eine CaF_2 -Platte mit dreizähliger Symmetrie, besteht also aus einem Material mit spannungs-
05 doppelbrechenden Eigenschaften. Seine Umfangsfläche 161 hat im wesentlichen die Form eines gleichseitigen Dreiecks mit abgerundeten Ecken und leicht in Richtung auf den Dreiecksmittelpunkt (Durchstoßpunkt der optischen Achse O) hin eingewölbten Seitenflächen.
- 10 Das Korrekturelement 144 ist in einer runden Fassung 150 montiert und steht über je einen Abschnitt an jeder der abgerundeten Ecken der Umfangsfläche 161 mit jeweils einem Piezo-Aktuator 151 bis 153 in Verbindung. Jeder
15 Piezo-Aktuator 151 bis 153 ist auf der vom Korrekturelement 144 abgewandten Seite in die Fassung 150 eingelassen. Über Signalleitungen 154 bis 156, die durch entsprechende Bohrungen in der Fassung 150 nach außen geführt sind, stehen die Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 mit einer Pie-
20 zo-Ansteuereinheit 157 in Verbindung. Letztere steht über eine Signalleitung 158 mit einer Synchronisationseinheit 159 in Verbindung, die wiederum über eine Signalleitung 160 mit der Lichtquelle 101 verbunden ist.
- 25 Beim Einsatz ist das Korrekturelement 144 in das Projektionsobjektiv (vgl. Objektiv 4 in Fig. 1) integriert, wobei es in einem kreisförmigen Durchtrittsbereich 162, der in Figur 2 gestrichelt dargestellt ist, von Projektionslicht durchtreten werden kann. Das Korrekturelement 144
30 funktioniert dann folgendermaßen:

Die Lichtquelle 101 ist ein Excimer-Laser, der durch einen Quasi-cw-Projektionslicht-Impulszug mit Einzelimpulsen kurzer Impulsdauer (ungefähr 10 ns) und einer
35 relativ geringen Repetitionsrate im Bereich von 10 kHz

charakterisiert ist.

Die Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 werden durch die Piezo-Ansteuereinheit 157 so angesteuert, daß das Korrekturale-
05 ment 144 in radiale Dichteschwingungen versetzt wird. Die Frequenz dieser Schwingungen wird mit Hilfe der Synchronisiereinheit 159 auf die Repetitionsrate der Lichtquelle 101 abgestimmt, so daß während des Laserimpulses ein Maximum der durch die Piezo-Aktuatoren
10 151 bis 153 z.B. sinsusförmig erzeugten Druckspannung im Korrekturalelement 144 erreicht wird. Während der kurzen Impulsdauer der Einzellichtimpulse, die nur ca. ein Zehntausendstel der Repetitionsperiode der Lichtquelle 101 und der Dauer der Krafteinleitung in das Korrektur-
15 element 144 beträgt, ist die in das Korrekturalelement eingeleitete momentane Kraft in guter Näherung konstant. Daher treten während der Impulsdauer der Einzellichtimpulse, unabhängig von der Phasenbeziehung zwischen dem Laserimpuls und der Krafteinleitung, keine nennenswerten Änderungen
20 des Doppelbrechungszustandes des Korrekturalelements 144 auf.

Über die Amplitude der z.B. sinusförmigen Signalspannung auf den Signalleitungen 154 bis 156 kann die Spannungsdop-
25 pelbrechung mittels der Piezo-Ansteuereinheit 157 eingestellt werden. Alternativ ist auch eine Einstellung der Spannungsdoppelbrechung über die Phasenbeziehung zwischen dem Laserimpuls und der Krafteinleitung möglich. Diese Phasenbeziehung kann so geändert werden, daß der Laser-
30 impuls nicht mehr während des Maximums der Druckspannung, sondern z.B. während eines wählbaren Abschnitts auf der steigenden oder fallenden Flanke der eingeleiteten Druckspannung durch das Korrekturalelement 144 tritt.

35 Die Geometrie des Korrekturalelements 144 ist derart an

die Geometrie der Kraftaneinleitung durch die Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 und an die Krafteinleitungsfrequenz angepaßt, daß eine Eigenschwingung des Korrektorelements 144 in Resonanz mit der Krafteinleitungsfrequenz ist. Dies gewährleistet eine maximale Kraftwirkung und damit eine maximale erzeugte Spannungsdoppelbrechung bei gegebenem Kraftaufwand. Bei dieser Ausführung entstehen zudem neben Druckspannungen auch Zugspannungen durch das resonante Schwingen des Festkörpers, wodurch die Vielfalt der möglichen Doppelbrechungsverteilungen wesentlich vergrößert wird.

Mit Hilfe der Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 (vgl. Fig. 2) kann, eine entsprechende Ansteuerfrequenz der Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 vorausgesetzt, eine stehende oder auch eine laufende Schallwelle im Korrektorelement 144 erzeugt werden. Zur Erzeugung einer stehenden Schallwelle wird die Ansteuerfrequenz für die Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 an die Geometrie und an das Material des Korrektorelements 144 entsprechend angepasst. Entsprechend der Anzahl der über die Umfangsfläche 161 auf das Korrektorelement 144 einwirkenden Piezo-Aktuatoren läßt sich eine entsprechende Zähligkeit der entstehenden Schallwelle erzeugen. Mit n Piezo-Aktuatoren läßt sich hierbei eine stehende Schallwelle mit bis zu $n/2$ -zähliger Symmetrie erzeugen. Zudem lassen sich Überlagerungen von Schallwellen mit verschiedener Zähligkeit erzeugen. Dies führt zu einem über das Schallwellenprofil gesteuert vorgebbaren Brechungsindexprofil im Korrektorelement 144.

Durch die Überlagerung von Schallwellenprofilen verschiedener Zähligkeiten läßt sich als Superposition eine entsprechende Überlagerung von Brechungsindexprofilen einstellen, die zur unabhängigen Korrektur einer Mehrzahl von Abbildungsfehlern einsetzbar ist, da z. B. über die

verschiedenen Brechungsindexbeiträge von Schallwellenprofilen unterschiedlicher Zähligkeit die Abbildungseigenschaften beschreibende Koeffizienten von Zernike-Funktionen in vorgegebener Weise beeinflusst werden.

05

Für gegenwärtig eingesetzte Korrekturalelement-Materialien und typische Korrekturalelement-Geometrien ergeben sich einzusetzende Ansteuerfrequenzen für die Piezo-Aktuatoren 151 bis 153 im Ultraschallbereich.

10

Mit der erzeugten Spannungsdoppelbrechungsverteilung, die über die Geometrie des Korrekturalelements 144, über die Geometrie der Ankopplung der Piezo-Aktuatoren 151 bis 153, über die Amplitude und Frequenz der Krafteinleitung sowie ggf. über Komponenten, welche Schwingungsknoten im Korrekturalelement 144 erzwingen, angepaßt werden kann, wird das das Korrekturalelement 144 durchtretende Projektionslichtbündel so beeinflusst, daß die sonstigen Doppelbrechungseffekte in der Projektionsoptik kompensiert werden, wie im Zusammenhang mit Fig. 1 erläutert.

20

Alternativ zu Piezo-Aktuatoren können auch andere Druck- oder Zugmittel zur Krafteinleitung eingesetzt werden.

Figur 3 zeigt in einem Meridionalschnitt eine weitere Variante eines optischen Korrekturalelements mit einer Krafteinleitungseinrichtung, die zu derjenigen, die im Zusammenhang mit der Figur 2 beschrieben wurde, alternativ ist.

30

Bei der Ausführung gemäß Figur 3 ist das optische Korrekturalelement 244 eine symmetrisch bikonkave Linse aus CaF_2 , auf die eine insgesamt mit 270 bezeichnete Krafteinleitungseinrichtung randseitig einwirkt. Das optische Korrekturalelement 244 und die Krafteinleitungseinrichtung 270

35

sind um eine in Figur 3 strichpunktiert gezeigte optische Achse 271 mehrzählig rotationssymmetrisch, so daß sich die Darstellung der Figur 3 auf die von der optischen Achse 271 aus gesehen rechte Hälfte beschränkt.

05

Randseitig ist das Korrekturalelement 244 oben und unten abgefast, so daß die Umfangsfläche 272 des Korrekturalelements 244 über jeweils eine ringförmige Fasenfläche 273, 274 in die konvexen optischen Flächen des Korrekturalelements 244 übergeht. Da die Fasenflächen 273, 274 nicht Teil der optischen Flächen des Korrekturalelements 244 sind, können sie als Teil der gesamten Umfangsfläche von diesem angesehen werden.

10

Die in Figur 3 untere Fasenfläche 274 liegt über eine Anlagespitze 275 eines Anlagekörpers 276 auf einem die Fassung des Korrekturalelements 244 bildenden Grundkörper 277 auf. Der Anlagekörper 276 und der Grundkörper 277 sind flächig miteinander verbunden, z. B. miteinander verklebt. Der Grundkörper 277 weist eine Mehrzahl randseitiger Bohrungen 278 auf, die parallel zur optischen Achse 271 durch den Grundkörper 277 ausgeführt sind und der Befestigung des Grundkörpers 277 an einem nicht dargestellten Halterahmen für das Korrekturalelement 244 dienen.

20

25

Am Grundkörper 277 ist eine Mehrzahl von Hebelkörpern 279 gelenkig angebracht. Es können z.B. drei um die Umfangsfläche 272 des Korrekturalelements 244 gleichverteilt angeordnete Hebelkörper 279 vorliegen. Die Anzahl der Hebelkörper 279 gibt die Zähligkeit der Rotationssymmetrie der Krafteinleitungseinrichtung 270 vor. Von den Hebelkörpern 279 ist in Figur 3 nur einer dargestellt. Die Hebelkörper 279 weisen alle den gleichen Aufbau auf, so daß es im folgenden genügt, den in Figur 3 dargestellten Hebelkörper

30

35

279 zu beschreiben. Dieser ist über ein Gelenk 280 am Grundkörper 277 angelenkt. Das Gelenk 280 weist wie die anderen Gelenke, die die anderen Hebelkörper 279 mit dem Grundkörper 277 verbinden, eine Gelenkachse auf, die parallel zu einer Tangente an den nächsten Punkt der Umfangsfläche 272 des Korrektorelements 244 verläuft. Die Gelenke (vgl. Gelenk 280) sind dabei in einer Höhe angeordnet, die der Lage der zur optischen Achse 271 senkrechten Mittelebene des Korrektorelements 244 entspricht.

Auf der von der Umfangsfläche 272 abgewandten Seite des Gelenks 280 weisen der Grundkörper 277 und der Hebelkörper 279 einander zugewandte stufenförmige Rücksprünge auf, so daß insgesamt eine dem Gelenk 280 benachbarte Aufnahmeausnehmung 281 entsteht. In diese ist ein Piezo-Aktuator 282 eingesetzt, der in zur optischen Achse 271 paralleler Richtung längenveränderlich ist. Durch eine in Figur 3 angedeutete Steuerleitung 283 ist der Piezo-Aktuator 282 mit einer Steuereinrichtung 284 verbunden.

Über einen Anlagekörper 285 und eine Anlagespitze 286 liegt der Hebelkörper 279 an der in Figur 3 oberen Fasenfläche 273 an, so daß der Hebelkörper 279 mit dem ihm zugeordneten Abschnitt des Grundkörpers 277 über die Anlagekörper 285, 276 nach Art einer Zange an den Fasenflächen 273, 274 des Korrektorelements 244 angreift.

Das an die Krafteinleitungseinrichtung 270 gekoppelte Korrektorelement 244 wird folgendermaßen eingesetzt:

Anhand des zu kompensierenden Abbildungsfehlers berechnet die Steuereinrichtung 284 eine Spannungsverteilung, die im Korrektorelement 244 einzustellen ist, damit durch die über diese Spannungsverteilung hervorgerufenen

Änderungen der optischen Eigenschaften des Korrektorelements 244 eine Kompensation des Abbildungsfehlers erreicht wird. Aus der berechneten Spannungsverteilung ermittelt die Steuereinrichtung 284 Auslenkwerte, die die Piezo-
05 Aktuatoren 282 der Krafteinleitungseinrichtung 270 auf die jeweiligen Hebelkörper 279 übertragen müssen, damit sich durch die sich hierdurch ergebende Zangenwirkung zwischen dem Grundkörper 277 (vgl. Anlagespitze 275) und den Hebelkörpern 279 mit den Auflagespitzen 286 auf
10 die Fasenflächen 273, 274 eine Krafteinleitung ergibt, die zur Ausbildung der berechneten Spannungsverteilung führt. Die Anlagespitzen 275, 286 gewährleisten hierbei eine definierte Krafteinleitung ohne Verkanten. Diese Resultierende der eingeleiteten Kräfte verläuft aufgrund
15 der Symmetrie der durch die Auflagekörper 276, 285 gebildeten Zangen bezüglich der Mittelebene des Korrektorelements 244 in dieser mit der neutralen Fläche des Korrektorelements 244 zusammenfallenden Mittelebene. Auf diese Weise wird ein Durchbiegen des Korrektorelements 244 bzw.
20 das Übertragen eines Biegemomentes auf dieses durch die Kraftwirkung der Piezo-Aktuatoren 282 vermieden.

Figur 4 zeigt einen alternativen Anlagekörper 385 in einem Detailausschnitt, der demjenigen entspricht, der
25 in Figur 3 durch einen durchgezogenen Kreis markiert ist. Der Anlagekörper 385 ist am Hebelkörper 379 über zwei Gelenkverbindungen 387, 388 angelenkt. Diese sind an den "Dachkanten" zweier Dreiecksausleger des Hebelkörpers 379 angeordnet, zwischen denen der Hebelkörper 379
30 zurückversetzt ist, so daß er vom Anlagekörper 385 zwischen den Gelenkverbindungen 387, 388 beabstandet ist.

Der Anlagekörper 385 ist aus federndem Material. Auf seiner vom Hebelkörper 379 abgewandten Seite weist der
35 Anlagekörper 385 eine Anlagennase 389 auf, die auf der

Fasenfläche 373 des Korrekturlements 344 aufliegt.

Auch die anderen Anlagekörper bei der Ausführungsform gem. Figur 3 können nach Art des Anlagekörpers 385 gem. Fig. 05 4 ausgeführt sein.

Der Anlagekörper 385 funktioniert folgendermaßen:

10 Je nach der geometrischen Lage der beiden Gelenkverbindungen 387, 388 zur Fasenfläche 373 ist der Anlagekörper 385, solange keine Krafteinleitung erfolgt, entweder parallel zur Fasenfläche 273 oder unter einem bestimmten Winkel zu dieser angeordnet. Durch die Federwirkung des Anlagekörpers 385 sowie die Gelenkverbindungen 378, 388 15 wird sichergestellt, daß unabhängig vom Vorliegen eines derartigen Winkels die Anlagenase 389 bei der Krafteinleitung immer ohne Verkanten auf die Fasenfläche 373 wirkt.

20 Die Gelenkverbindungen 387, 388 können als konventionelle Gelenkverbindungen oder auch als Festkörpergelenke ausgeführt sein.

Eine alternative, eine dreizählige Rotationssymmetrie 25 aufweisende Krafteinleitungseinrichtung 470 für das Korrekturlement 444 ist in den Figuren 5 und 6 dargestellt. Der Grundkörper 477 mit den Bohrungen 478 ist als die Umfangsfläche 472 des Korrekturlements 444 umgebender Ring ausgebildet, der auch in der Figur 6 nur ausschnitts- 30 weise dargestellt ist.

Die Krafteinleitungseinrichtung 470 ist zudem bezüglich der senkrecht auf der optischen Achse 471 stehenden Mittelebene des Korrekturlements 444 spiegelsymmetrisch, so daß es im 35 folgenden genügt, nur die in Figur 5 obere Hälfte der

Krafteinleitungseinrichtung 470 im Detail zu beschreiben.

Flächig mit dem Grundkörper 470 verbunden ist eine Mehrzahl von Scher-Piezo-Aktuatoren 490, von denen in Figur 5 zwei
05 gezeigt sind, die einander gegenüberliegend beidseitig des Grundkörpers 477 an diesem anliegen. Über Steuerleitungen 483 stehen die Scher-Piezo-Aktuatoren 490 mit der Steuereinrichtung 484 in Verbindung.

10 Auf der vom Grundkörper 477 jeweils abgewandten Seite sind die Scher-Piezo-Aktuatoren 490 flächig mit Schubkörpern 491 verbunden, die über Anlagekörper 476, 485 mit Anlagespitzen 475, 486 an den Fasenflächen 473, 474 des Korrekturlements 444 anliegen.

15 Insgesamt wird die Krafteinleitungseinrichtung 470 durch drei Paare von bezüglich des Grundkörpers 477 einander gegenüberliegenden Schubkörpern 491 mit zugehörigen Scher-Piezo-Aktuatoren 490 gebildet, die, jeweils um 120°
20 versetzt, um die Umfangsfläche 472 des Korrekturlements 444 angeordnet sind.

Das Korrekturlement 444 mit der Krafteinleitungseinrichtung 470 wird folgendermaßen eingesetzt:

25 Zunächst erfolgt in der Steuereinrichtung 484 analog zum im Zusammenhang mit der Figur 3 Beschriebenen eine Berechnung von Sollwerten für die Krafteinleitung der Schubkörper 491 bzw. der zugehörigen Auslenkungen der
30 Scher-Piezo-Aktuatoren 490. Diese Soll-Vorgaben werden durch Ansteuerung der Scher-Piezo-Aktuatoren 490 über die Steuerleitungen 483 in die gewünschte Spannungsverteilung im Korrekturlement 444 umgesetzt.

35 Die über die Scher-Piezo-Aktuatoren 490 vermittelten,

über die Anlagespitzen 475 einerseits und 486 andererseits wirkenden Teilkräfte werden derart bemessen, daß sie sich zu einer Gesamtkraft in der neutralen Fläche des Korrekturlements 444 addieren. Analog zum oben im Zusammenhang mit der Krafteinleitungseinrichtung 270 beschriebenen werden somit keine Biegemomente auf das Korrekturlement 444 ausgeübt.

Die Figuren 7 und 8 zeigen eine weitere Alternative eines Korrekturlements 544, in dem mittels einer Krafteinleitungseinrichtung 570 eine definierte Spannungsverteilung erzeugt wird. Das Korrekturlement 544 ist in diesem Fall eine asymmetrisch bikonkave Linse mit einer oberen Fasenfläche 573 und einer unteren Fasenfläche 574 im Randbereich. Diese ist über eine Mehrzahl von in Richtung der optischen Achse 571 des Korrekturlements 544 nachgiebigen Federarmen 592 gehalten. Hierzu liegt die untere Fasenfläche 574 an einer entsprechend abgelenkten Stützfläche der Federarme 592 an.

Die Federarme 592 weisen jeweils einen sich an diese Stützfläche anschließenden Federarmabschnitt senkrecht zur optischen Achse 571 und einen diesen gegenüber rechtwinklig in Richtung der optischen Achse 571 abknickend verlaufenden zweiten Federarmabschnitt auf. Dieser zweite Federarmabschnitt geht über in einen die zweiten Federarmabschnitte aller Federarme 592 tragenden Verbindungsring über, dessen Innendurchmesser größer ist als der Außendurchmesser des Korrekturlements 544.

An seiner äußeren Umfangsfläche geht der Verbindungsring einstückig in einen den Verbindungsring coaxial umgebenden Federring 593 über. Letzterer hat verglichen mit dem Verbindungsring gemessen parallel zur optischen Achse eine geringere Materialstärke. Der Federring 593 verbindet

den Verbindungsring einstückig mit dem ringförmigen Grundkörper 577 über, welcher seinerseits den Federring 593 coaxial außen umgibt.

05 Figur 7 zeigt einen Ausschnitt der Federarm-Halterung des Korrekturlements 544, wobei insgesamt sechs Federarme 592 in dieser Darstellung sichtbar sind, davon zwei Federarme 592 je zur Hälfte. Insgesamt weist die Federarm-Halterung nach den Figuren 7 und 8 also zwanzig Federarme 10 592 auf, die gleichverteilt um den Umfang des Grundkörpers 577 an diesen angeformt sind und deren innere, die Stützflächen für das Korrekturlement 544 aufweisende Federarmabschnitte sich ähnlich wie Radspeichen radial nach innen erstrecken.

15 Die Krafteinleitungseinrichtung 570 der Ausführungsform gem. den Figuren 7 und 8 weist einen Stützring 594 auf, der coaxial in Bezug auf die optische Achse 571 um die Umfangsfläche 572 des Korrekturlements 544 herum angeordnet ist. An der inneren Mantelfläche des Stützrings 20 594 stützt sich eine Mehrzahl von Piezo-Aktuatoren 595 ab, die in zur optischen Achse 571 radialer Richtung längenveränderlich sind. Über Steuerleitungen 583 sind die Piezo-Aktuatoren 595 mit der Steuereinrichtung 584 25 verbunden.

Die Piezo-Aktuatoren 595 stützen sich zwischen dem Stützring 594 und an der Umfangsfläche 572 des Korrekturlements 544 anliegenden Anlagekörpern 576 ab, die zwischen den 30 Piezo-Aktuatoren 595 und dem Korrekturlement 544 angeordnet sind. Die Anlagekörper 576 weisen jeweils zwei parallel zur Richtung der optischen Achse 571 versetzt angeordnete halbkugelige Anlagevorsprünge 596, 597 auf. Insgesamt liegen beim Ausführungsbeispiel der Figuren 7 35 und 8 zwanzig in Umfangsrichtung des Stützrings 594 gleich

verteilt angeordnete Piezo-Aktuatoren 595 mit zugehörigen Anlagekörpern 576 vor. Die Anordnung der Piezo-Aktuatoren 595 in Umfangsrichtung des Korrekturlements 544 ist dabei derart, daß, wie die Aufsicht der Figur 8 zeigt, jeweils
05 ein Piezo-Aktuator 595 in Umfangsrichtung des Stützrings 594 zwischen zwei Federarmen 592 liegt.

Durch die Abstützung der Piezo-Aktuatoren 595 am Stützring 594 einerseits und über die Anlagekörper 576 am Korrektur-
10 element 544 andererseits ergibt sich eine freitragende Halterung der Krafteinleitungseinrichtung 570, getragen nur durch das Korrekturlement 544. Dabei sind die Piezo-Aktuatoren 595 parallel zur Richtung der optischen Achse 571 relativ zum Stützring 594 und unabhängig davon auch
15 zu den Anlagekörpern 576 verschiebbar.

Die Krafteinleitungseinrichtung 570 wird folgendermaßen montiert und zur Erzeugung einer Spannungsverteilung im Korrekturlement 544 eingesetzt:

20

Zunächst werden die Anlagekörper 576 um die Umfangsfläche 572 des Korrekturlements 544 herum entsprechend den Anforderungen, die an die zu erzeugende Spannungsverteilung gestellt sind, verteilt und ausgerichtet. In ihren Soll-
25 Positionen werden die Anlagekörper 576 mittels Hilfs-Fixierelementen, z. B. auf benachbarten Federarmen 592 aufgesetzten Halteelementen, vorläufig fixiert. Anschließend wird der Stützring 594 in Position um die Umfangsfläche 572 herum gebracht und ebenfalls mittels Hilfs-
30 Fixierelementen vorläufig fixiert. Die Piezo-Aktuatoren 595 werden nun zwischen die Anlagekörper 576 und den Stützring 594 eingeführt. Die Piezo-Aktuatoren 595 sind so bemaßt, daß ein satter Paßsitz zwischen den Anlagekörpern 576 und dem Stützring 594 vorliegt. Die Hilfs-Fixierele-
35 mente können dann abgenommen werden.

In zur optischen Achse 571 paralleler Richtung werden die Piezo-Aktuatoren 595 derart justiert, daß sich über ihre Längenveränderung und die dadurch auf das Korrekturalelement 05 544 ausgeübte Kraftwirkung der jeweiligen Piezo-Aktuatoren über die Anlagevorsprünge 596, 597 eine Gesamtkraft des jeweiligen Piezo-Aktuators 595 auf das Korrekturalelement 544 ergibt, die längs dessen neutraler Fläche verläuft, so daß durch die Piezo-Aktuatoren 595 keine Biegemomente 10 auf das Korrekturalelement 544 ausgeübt werden.

Schließlich wird, wie oben im Zusammenhang mit der Steuereinrichtung 284 beschrieben, über die Steuerleitungen 583 eine von der Steuereinrichtung 584 berechnete Spannung 15 an die Piezo-Aktuatoren 595 übertragen, so daß eine vorgegebene Spannungsverteilung erzeugt wird.

Alternativ zu den voneinander getrennten Anlagekörpern 576 beim Ausführungsbeispiel der Figuren 7 und 8 kann 20 stattdessen auch ein zum Stützring 594 coaxial ausgeführter Anlagering eingesetzt werden.

Weitere Varianten von Anlagekörpern, die im Zusammenhang mit den Krafteinleitungseinrichtungen einsetzbar sind, 25 welche oben unter Bezug auf die Fig. 2 bis 8 beschrieben wurden, zeigen die Figuren 9 bis 12.

Der Anlagekörper 676 in Figur 9 wird von einem längenveränderlichen Piezo-Aktuator 695 in zur optischen Achse des 30 Korrekturalelements 644 radialer Richtung gegen dessen Umfangsfläche 672 gedrückt. Dabei liegt der Anlagekörper 676 über insgesamt 5 Anlagevorsprünge 697', 697'', 697''', 697''''', 697''''', an der Umfangsfläche 672 an. Die Anlagekörper 697' bis 697'''''' sind an einer Anlageleiste 35 698 angeformt, die in einer zur optischen Achse des

Korrekturelements 644 senkrechten Schnittebene eine in etwa mondsichelförmige Querschnittsfläche aufweist. Über Tragarme 699 ist die Anlageleiste 698 mit einer Tragleiste 669 einstückig verbunden. Letztere liegt mit ihrer von
05 der Anlageleiste 698 abgewandten Endfläche am Piezo-Aktuator 695 an.

Aufgrund der Querschnittsflächen-Gestaltung der Anlageleiste 698 weist diese im Bereich des mittleren Anlagevorsprungs 697''' die höchste Biegesteifigkeit auf,
10 welche hin zu den randseitigen Anlagevorsprüngen 697' bzw. 697'''' progressiv abnimmt. Bei einem Druck des Piezo-Aktuators 695 auf das Korrekturlement 644 über die Anlagevorsprünge 697' bis 697'''' ergibt sich aus dieser
15 Querschnittsflächen-Gestaltung eine charakteristische Druckverteilung auf das Korrekturlement 644. Diese kann, wie auch bei den anderen beschriebenen Ausführungsformen, zusätzlich noch von der Querschnittsflächen-Gestaltung senkrecht zur Anlageleiste 698 abhängen. Diese Druckver-
20 teilung führt zu einer entsprechenden Spannungsverteilung im Korrekturlement 644. Neben der Querschnittsflächen-Gestaltung der Anlageleiste 698 wirkt sich z. B. auch die Materialauswahl für diese auf die Biegesteifigkeitsverteilung aus. Die Anlageleiste kann hierbei insgesamt aus
25 einem Material mit konstantem Elastizitätsmodul oder auch aus einem Verbund von Materialien verschiedener Biegesteifigkeit, die insbesondere längs der Anlageleiste 698 variiert, bestehen.

30 Figur 10 zeigt eine weitere Variante eines Anlagekörpers 776. Bei diesem ist, wie ein Vergleich der dargestellten Aufsichten zeigt, die Anlageleiste 798 auf der vom Korrekturlement 744 abgewandten Seite in etwa komplementär zur Anlageleiste 698 von Figur 9 geformt, d. h. der Querschnitt
35 der Anlageleiste 798 ist im Bereich des mittleren Anlage-

vorsprungs 797''' am geringsten und nimmt in Richtung der äußeren Anlagevorsprünge 797', 797'''' progressiv zu. Beim Druck auf den Anlagekörper 776 mit dem Piezo-Aktuator 795 resultiert daher eine entsprechend andere Druckverteilung über die Anlagevorsprünge 797' bis 797'''' auf das Korrektur-
05 element 744, als dies beim Druck auf den Anlagekörper 676 der Fall ist.

Figur 11 zeigt eine weitere Variante eines Anlagekörpers 876. Dort ist die Anlageleiste 898 über einen zentralen Verbindungsabschnitt 868 mit der Tragleiste 869 verbunden. Die Anlageleiste 898 hat eine zur Anlageleiste 698 gemäß Figur 9 ähnliche Querschnittsgestaltung, weist also bezüglich den zur Zeichenebene der Fig. 11 parallelen
15 Schnittebenen im Bereich des mittleren Anlagevorsprungs 897'', in dem sie in den Verbindungsabschnitt 868 übergeht, den größten Querschnitt auf, welcher hin zu den randseitigen Anlagevorsprüngen 897' bzw. 897'''' progressiv abnimmt. Entsprechend der Form des Anlagekörpers 876 und
20 der Querschnitts-Gestaltung sowie der Materialauswahl für die Anlageleiste 898 ergibt sich auch hier bei einer Druckausübung auf das Korrektur-
element 844 mittels des Piezo-Aktuators 895 eine vorgegebene Druckverteilung, die die Anlagevorsprünge 897' bis 897'''' auf die Um-
25 fangsfläche 872 des Korrektur-
elements 844 ausüben.

Figur 12 zeigt noch eine Ausgestaltung eines Anlagekörpers 976. Dieser liegt auf seiner vom Korrektur-
element 944 abgewandten Seite ebenfalls flächig am Piezo-Aktuator 995 an. An der vom Piezo-Aktuator 995 abgewandten und der Umfangsfläche 972 des Korrektur-
30 elements 944 zugewandten Fläche sind am Anlagekörper 976 vier Druckfedern 967' bis 967'''' angebracht, die über halbkugelige Anlageabschnitte an der Umfangsfläche 972 des Korrektur-
elements 944 anliegen. Die Druckfedern 967' bis 967'''' weisen
35

- unterschiedliche vorgegebene Federkonstanten auf. So haben die beiden mittleren Druckfedern 967'', 967''' eine größere Federhärte als die beiden außenliegenden Druckfedern 967', 967'''. Dies führt dazu, daß bei einer Druckausübung auf
- 05 den Anlagekörper 976 mittels des Piezo-Aktuators 995 die beiden mittleren Druckfedern 967'', 967''' eine größere Kraft auf die Umfangsfläche 972 ausüben als die beiden außenliegenden Druckfedern 967', 967'''.
- 10 Je nach den Anforderungen an die vorzugebende Spannungsverteilung können die Querschnittsflächenformen der Anlageleisten 698 bis 898 bzw. die Federkonstanten der Druckfedern 967' bis 967''' auch andere Formen bzw. Wertverteilungen aufweisen.
- 15 Die beschriebenen und zitierten und beanspruchten Maßnahmen können in unterschiedlichster Weise kombiniert werden, auch wenn dies nicht im einzelnen beschrieben ist.

Patentansprüche

=====

- 05 1. Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie mit
- a) einer Lichtquelle (1), insbesondere mit einer Wellen-
länge im Bereich von 250 bis 100 nm;
- 10 b) einem Beleuchtungssystem (2);
- c) einem Masken-Positionier-System (31);
- 15 d) einem Projektionsobjektiv (4), vorzugsweise mit
einer bildseitigen numerischen Apertur (NA) im Bereich
von 0,7 bis 0,95, mit einer Systemaperturebene (P)
und mit einer Bildebene (5), enthaltend mindestens
eine Linse (42,43) aus einem Material, das vom Durch-
trittswinkel (α) abhängige Doppelbrechung aufweist,
insbesondere nahe der Bildebene (5) angeordnet;
- 20 e) einem Objekt-Positionier-System (51);

dadurch gekennzeichnet, daß

- 25 im Beleuchtungssystem (2) oder im Projektionsobjektiv
(4) nahe einer Pupillenebene (P) ein optisches Element
(44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) vorge-
sehen ist, das eine ortsabhängige polarisationsdrehende
bzw. ortsabhängige unterschiedliche doppelbrechende Wirkung
30 aufweist und die von der mindestens einen Linse (42, 43)
erzeugten Doppelbrechungseffekte in der Bildebene (5)
mindestens teilweise kompensiert.

- 35 2. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch
gekennzeichnet, daß das Material der mindestens einen

Linse ein kubischer Fluoridkristall, insbesondere CaF_2 , BaF_2 oder SrF_2 ist.

- 05 3. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1 oder
2, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Durchtritts-
winkel (α) abhängige Doppelbrechung und die ortsabhängige
polarisationsdrehende bzw. ortsabhängige unterschiedliche
doppelbrechende Wirkung die gleiche mehrzählige, insbeson-
dere drei- oder vierzählige Rotationssymmetrie aufweisen.
- 10 4. Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem
der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
daß die mindestens eine Linse (42, 43) aus besagtem
Material, welches eine vom Durchtrittswinkel (α) abhängige
15 Doppelbrechung aufweist, zwischen der Systemaperturebene
(P) und der Bildebene (5) angeordnet ist, insbesondere
als bildseitig letzte Linse (43).
- 20 5. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorher-
gehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das
Element (44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944)
mit ortsabhängiger polarisationsdrehender bzw. ortsabhän-
giger unterschiedlicher doppelbrechender Wirkung nahe der
Systemaperturebene (P) des Projektionsobjektivs (4)
25 angeordnet ist.
- 30 6. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorherge-
henden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das
Element (44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944)
mit ortsabhängiger polarisationsdrehender bzw. ortsabhän-
giger unterschiedlicher doppelbrechender Wirkung ein
optisch aktives Element, insbesondere aus Quarz, oder ein
doppelbrechendes Element mit örtlich variierender Dicke
ist.

7. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß in der Bildebene (5) tangentiale oder radiale Polarisierung vorliegt.

05

8. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß im Beleuchtungssystem (2) oder im objektseitigen Teil (41) des Projektionsobjektivs (4) radiale Polarisierung erzeugt wird und daß nahe der Systemaperturebene (P) ein optisch aktives Element (44), insbesondere aus Quarz, angeordnet ist, welches eine Polarisationsdrehung zur tangentialen Polarisierung mit überlagerter Kompensation der von der mindestens einen Linse (42, 43) erzeugten Doppelbrechungseffekte bewirkt, und zwar durch geeignete örtliche Dickenverteilung des Elements (44).

15

9. Optisches System, insbesondere mikrolithographisches Projektionsobjektiv, mit

20

a) mindestens einem ersten optischen Element, das eine polarisationsabhängige Störung der Propagation über die Winkel der Lichtstrahlen eines durchtretenden Lichtbündels bewirkt;

25

dadurch gekennzeichnet, daß

b) mindestens ein zweites optisches Element (44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) vorgesehen ist, das eine vom Ort der Lichtstrahlen des Lichtbündels am zweiten optischen Element (44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) abhängigen Einfluss auf die Polarisierung bewirkt, derart, daß die Störung durch das erste optische Element (42, 43) zumindest teilweise kompensiert wird.

35

10. Optisches System nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß es
- 05 a) mindestens eine Feldebene (3, 5) und
- b) mindestens eine dazu fouriertransformierte Pupillenebene (P) aufweist, und daß
- 10 c) das erste optische Element (42, 43) nahe besagter Feldebene (3, 5) und
- d) das zweite optische Element (44; 144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) nahe einer besagten Pupillenebene (P) angeordnet ist.
- 15
11. Optisches System nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Störung der Propagation und der Einfluß auf die Polarisierung die gleiche mehr-
- 20 zählige, insbesondere drei- oder vierzählige Rotations-symmetrie aufweisen.
12. Optisches System, insbesondere mikrolithographisches Projektionsobjektiv, mit mindestens einem ersten
- 25 und einem zweiten optischen Element, die beide eine polarisationsabhängige Störung der Propagation über die Winkel der Lichtstrahlen eines durchtretenden Lichtbündels bewirken,
- 30 dadurch gekennzeichnet, daß
- das erste und das zweite optische Element derart um eine gemeinsame Symmetrieachse gegeneinander verdreht sind, daß die Drehwinkelbereiche maximaler Doppelbrechung des
- 35 ersten und des zweiten Elements gegeneinander versetzt sind.

13. Optisches System nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Merkmale mindestens eines der Ansprüche 9 bis 11 erfüllt sind.
- 05 14. Optisches System nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein optisches Element (144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) mit spannungsabhängiger ortsabhängig polarisationsdrehender bzw. ortsabhängig unterschiedlicher doppelbrechender Wirkung zur Änderung der polarisationsbeeinflussenden Wirkung an eine Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157; 270; 470; 570) angekoppelt ist.
- 10 15. Optisches System nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157; 270; 470; 570) mindestens einen Piezo-Aktuator (151 bis 153; 282; 490; 595) aufweist.
- 15 16. Optisches System nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157; 270; 470; 570) auf die Umfangsfläche (161; 272; 372; 472; 572; 672; 772; 872; 972) des optischen Elements (144; 244; 344; 444; 544; 644; 744; 844; 944) wirkt, ohne eine Durchbiegung von diesem hervorzurufen.
- 20 17. Optisches System nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Krafteinleitungseinrichtung (270; 470; 570) mindestens eine Krafteinleitungskomponente (276; 277, 279, 285; 379, 385; 476, 485, 491; 576) aufweist, die über Krafteinleitungskörper (275, 286; 389; 475, 486; 596, 597) an mindestens zwei Krafteinleitungsorten derart auf das optische Element (244; 344; 444; 544) wirkt, daß die Resultierende der Kräfte, die über die Krafteinleitungsorte auf das optische Element (244; 344; 444; 544)
- 25 30 35

wirken, in einer neutrale Fasern des optischen Elements (244; 344; 444; 544) enthaltenden neutralen Fläche verläuft.

- 05 18. Optisches System nach einem der Ansprüche 14 bis 17,
dadurch gekennzeichnet, daß ein Anlagekörper (389;
698; 798; 898), über den der Krafteinleitungskörper (385;
676; 776; 876) am Krafteinleitungsort anliegt, derart beweg-
lich ausgebildet ist, daß eine Ausrichtung des Anlagekör-
10 pers (389; 698; 798; 898) zum Krafteinleitungsort möglich
ist.
19. Optisches System nach Anspruch 18, dadurch gekennzeich-
net, daß der Anlagekörper (389; 698; 798; 898) über
15 eine Feder an einem Grundkörper (379; 669; 769; 869) des
Krafteinleitungskörpers (385; 676; 776; 876) angebracht
ist.
- 20 20. Optisches System nach Anspruch 18 oder 19, dadurch
gekennzeichnet, daß der Anlagekörper (389) über
mindestens ein Gelenk (387, 388) an einem Grundkörper
(379) des Krafteinleitungskörpers (385) angebracht ist.
- 25 21. Optisches System nach Anspruch 18, dadurch gekennzeich-
net, daß der Anlagekörper (389; 698; 798; 898) mit
einem Grundkörper (379; 669; 769; 869) des Krafteinleitungs-
körpers (385; 676; 776; 876) über mindestens ein bewegli-
ches Festkörpergelenk (387, 388; 698; 798; 898) verbunden
ist.
- 30 22. Optisches System nach Anspruch 21, dadurch gekennzeich-
net, daß der Anlagekörper (698; 798; 898) über einen
in Umfangsrichtung des optischen Elements (644; 744; 844)
ausgedehnten Krafteinleitungsort oder über mindestens
35 zwei in Umfangsrichtung des optischen Elements versetzte

Krafteinleitungsorte (697; 797; 897) auf das optische Element (644; 744; 844) wirkt, wobei der Anlagekörper (698; 798; 898) eine in Umfangsrichtung des optischen Elements (644; 744; 844) variierende Anlagekraft in das
05 optische Element (644; 744; 844) einleitet.

23. Optisches System nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Anlagekörper (698; 798; 898) eine in Umfangsrichtung des optischen Elements (644; 744; 844)
10 variierende Biegesteifigkeit aufweist.

24. Optisches System nach einem der Ansprüche 14 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß der Anlagekörper (976) über mindestens zwei in Umfangsrichtung des optischen
15 Elements (944) versetzte Federkörper (967) mit vorgegebener Federhärte eine in Umfangsrichtung des optischen Elements (944) variierende Kraft in das optische Element (944) einleitet.

20 25. Optisches System nach einem der Ansprüche 17 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß eine Krafteinleitungskomponente (276, 277, 279, 285; 379, 385; 476, 485, 491; 576) genau zwei Krafteinleitungskörper (275, 286; 389; 475, 486; 596, 597) aufweist, deren Krafteinleitungsorte
25 außerhalb der neutralen Fläche des optischen Elements (244; 344; 444; 544) angeordnet sind.

26. Optisches System nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Krafteinleitungskörper (276, 277, 279, 285) über ein Gelenk (280) miteinander verbunden
30 sind, wobei zwischen dem Gelenk (280) und einem der Krafteinleitungsorte jeweils ein erster Hebelarm des Krafteinleitungskörpers (276, 277, 279, 285) ausgebildet ist und an einem zweiten Hebelarm des Krafteinleitungs-
35 körpers (276, 277, 279, 285) ein Aktuator (282) angreift.

27. Optisches System nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Krafteinleitungskörper (276, 277, 279, 285) nach Art einer Zange ausgebildet sind, wobei ein einzelner Aktuator (282) zwischen den beiden zweiten Hebelarmen der Krafteinleitungskörper (276, 277, 279, 285) angeordnet ist und gleichzeitig auf beide zweite Hebelarme wirkt.
28. Optisches System nach Anspruch 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, daß einem Krafteinleitungskörper (475, 486; 596, 597) jeweils mindestens ein Aktuator (490; 595) zur Steuerung der Krafteinleitung in das optische Element (444; 544) zugeordnet ist.
29. Optisches System nach Anspruch 28, gekennzeichnet durch mindestens einen eine Scherwirkung aufweisenden Aktuator (490), der zwischen dem Krafteinleitungskörper (475, 486) und einem fassungsfesten Bauteil (477) einer Fassung des optischen Elements (444) wirkt.
30. Optisches System nach einem der Ansprüche 17 bis 24, gekennzeichnet durch eine Krafteinleitungskomponente (576) mit einem Krafteinleitungskörper (596, 597) mit mindestens zwei Krafteinleitungsorten, die in Richtung der optischen Achse (592) des optischen Elements (544) versetzt angeordnet sind.
31. Optisches System nach Anspruch 30, gekennzeichnet durch einen radial zum optischen Element (544) auf den Krafteinleitungskörper (596, 597) wirkenden Aktuator (595), der in Richtung der optischen Achse (592) des optischen Elements (544) verschiebbar angeordnet ist.
32. Optisches System nach Anspruch 31, gekennzeichnet

durch einen als Ring (594) um das optische Element (544) ausgebildeten Reaktionskörper für den Aktuator (595).

05 33. Optisches System nach einem der Ansprüche 14 bis 32, gekennzeichnet durch eine dynamisch wirkende Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157).

34. Optisches System nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, daß die Krafteinleitungseinrichtung (151
10 bis 157) derart ausgeführt ist, daß sie mit vorgegebener Frequenz auf das optische Element (144) wirkt.

35. Optisches System nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz der Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) im Bereich einer Resonanzfrequenz
15 der Körperschwingung des optischen Elements (144) liegt.

36. Optisches System nach einem der Ansprüche 33 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle
20 (101) derart ausgeführt ist, daß sie ein intermittierendes Projektionslichtbündel emittiert, und daß die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) derart ausgeführt ist, daß sie zeitlich abgestimmt auf das Projektionslichtbündel intermittierend auf das optische
25 Element (144) wirkt.

37. Optisches System nach Anspruch 36, gekennzeichnet durch eine Steuereinrichtung (159) zur Synchronisierung der Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) mit
30 der Lichtquelle (101).

38. Optisches System nach einem der Ansprüche 33 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) derart ausgebildet ist, daß sie
35 innerhalb des optischen Elements (144) ein Schallwellen-

profil erzeugt, dessen Verteilung einer vorgegebenen Superposition von Zernikefunktionen entspricht.

05 39. Optisches System nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) eine stehende Schallwelle im optischen Element (144) erzeugt wird.

10 40. Optisches System nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Krafteinleitungseinrichtung (151 bis 157) eine laufende Schallwelle im optischen Element (144) erzeugt wird.

15 41. Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie enthaltend ein optisches System, insbesondere ein Projektionsobjektiv, nach einem der Ansprüche 9 bis 40.

20 42. Herstellverfahren eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs, bei dem das Objektiv (4) komplett montiert wird und die Wellenfront in der Bildebene vermessen wird, dadurch gekennzeichnet, daß eine mehrzählig, insbesondere drei- oder vierzählig rotationssymmetrische Störung ausgewertet wird und davon abhängig das Dickenprofil eines optischen Elements (44), das insbesondere pupillennah angeordnet ist, mit der gleichen mehrzähligen Rotationssymmetrie verändert wird, so daß die mehrzählige rotationssymmetrische Störung der Wellenfront in der Bildebene (5) zumindest teilweise kompensiert wird.

30 43. Herstellverfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, daß das Mikrolithographie-Projektionsobjektiv ein optisches System nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 40 und/oder Teil einer Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8 oder 41 ist.

35

44. Mikrolithographisches Strukturierverfahren, gekennzeichnet durch die Verwendung einer Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8 oder 41 oder enthaltend ein optisches
- 05 System nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 40 oder hergestellt nach Anspruch 42 oder 43.

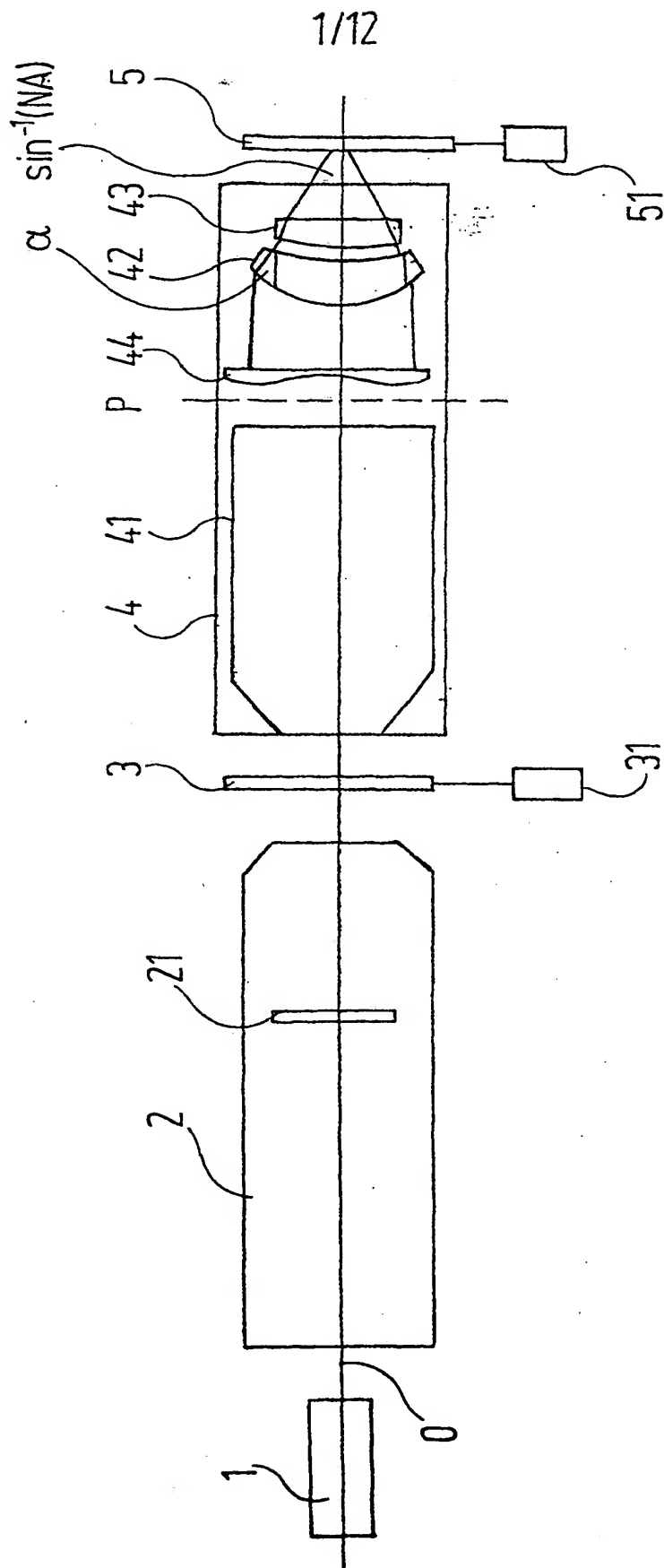


Fig. 1

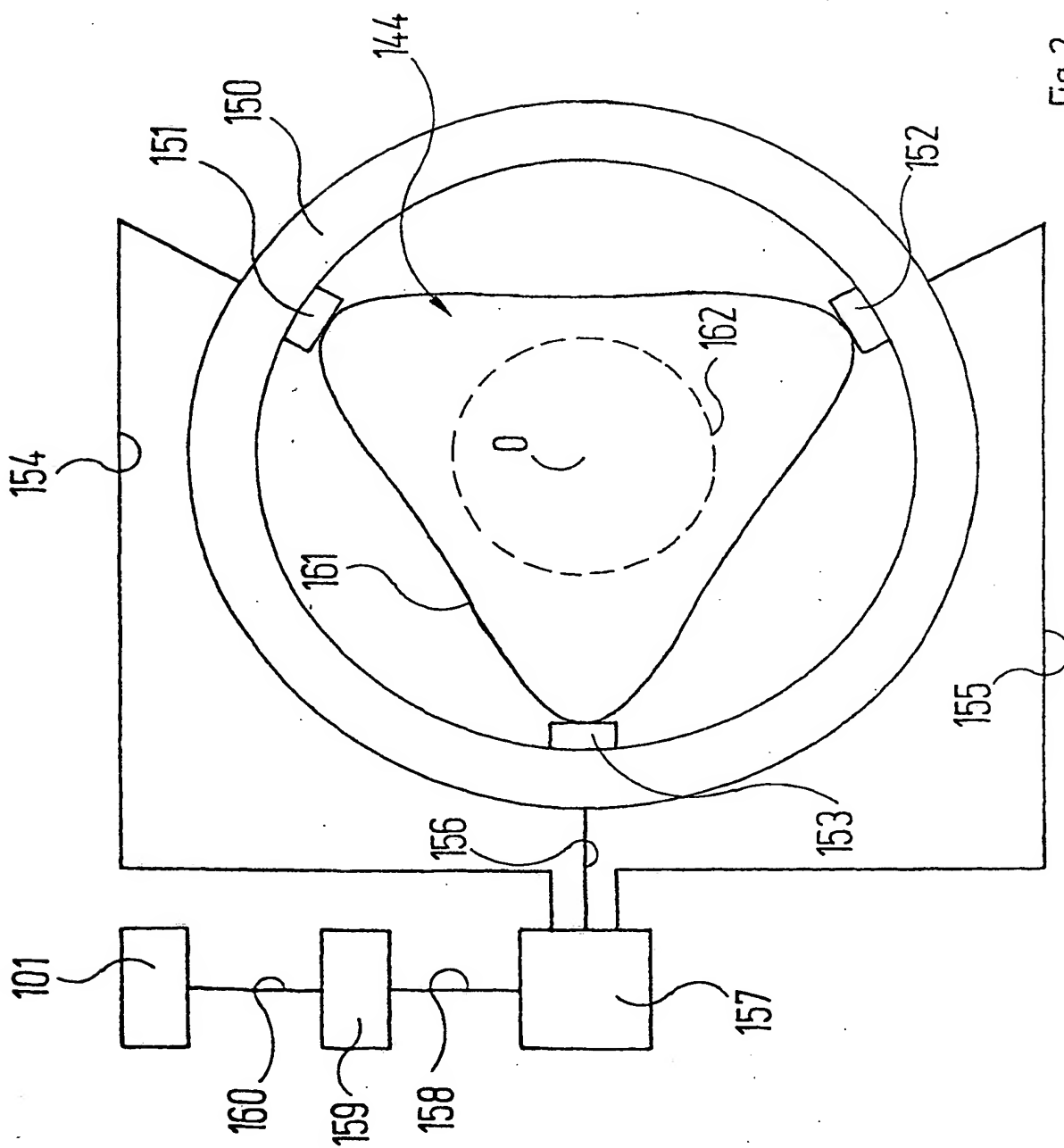


Fig. 2

3/12

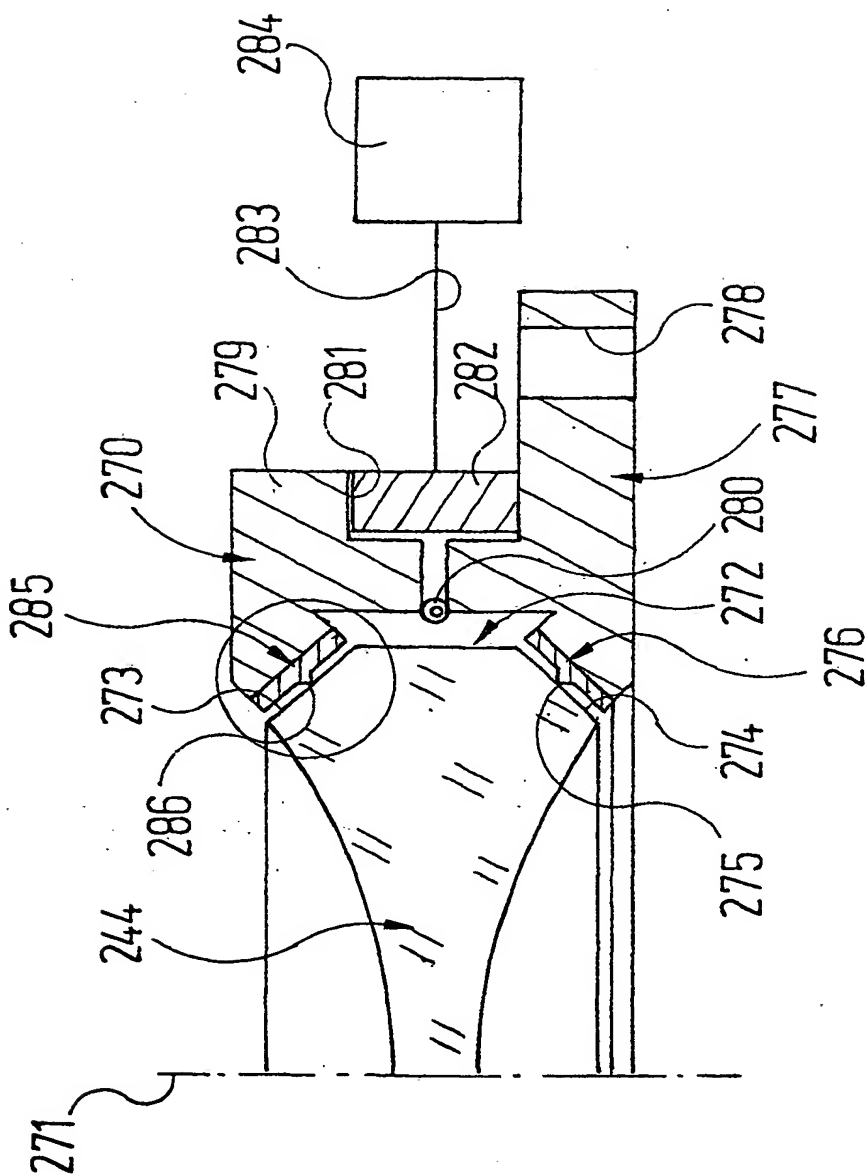


Fig. 3

4/12

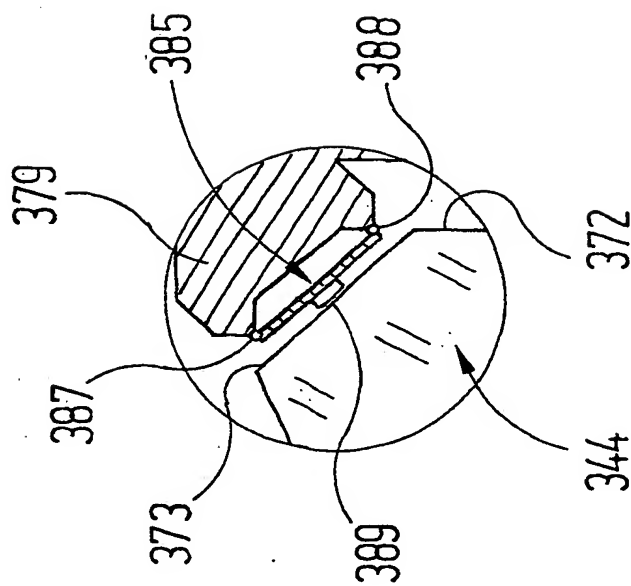
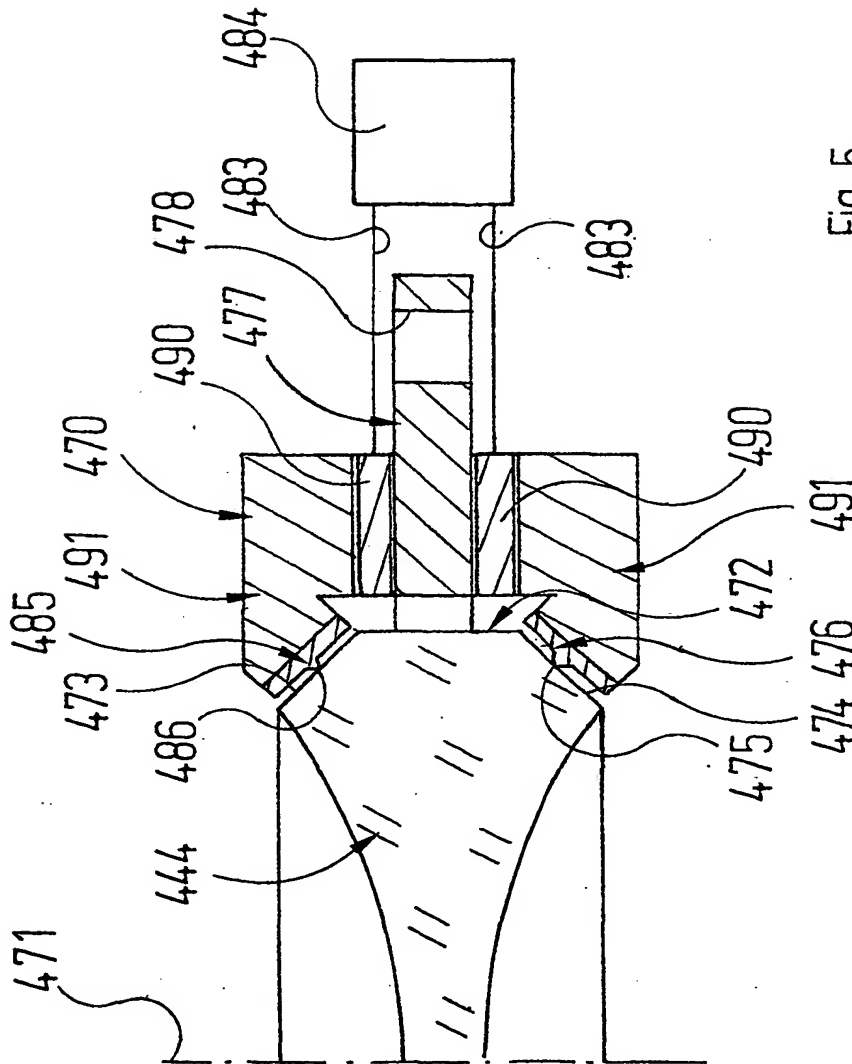


Fig. 4

5/12



6/12

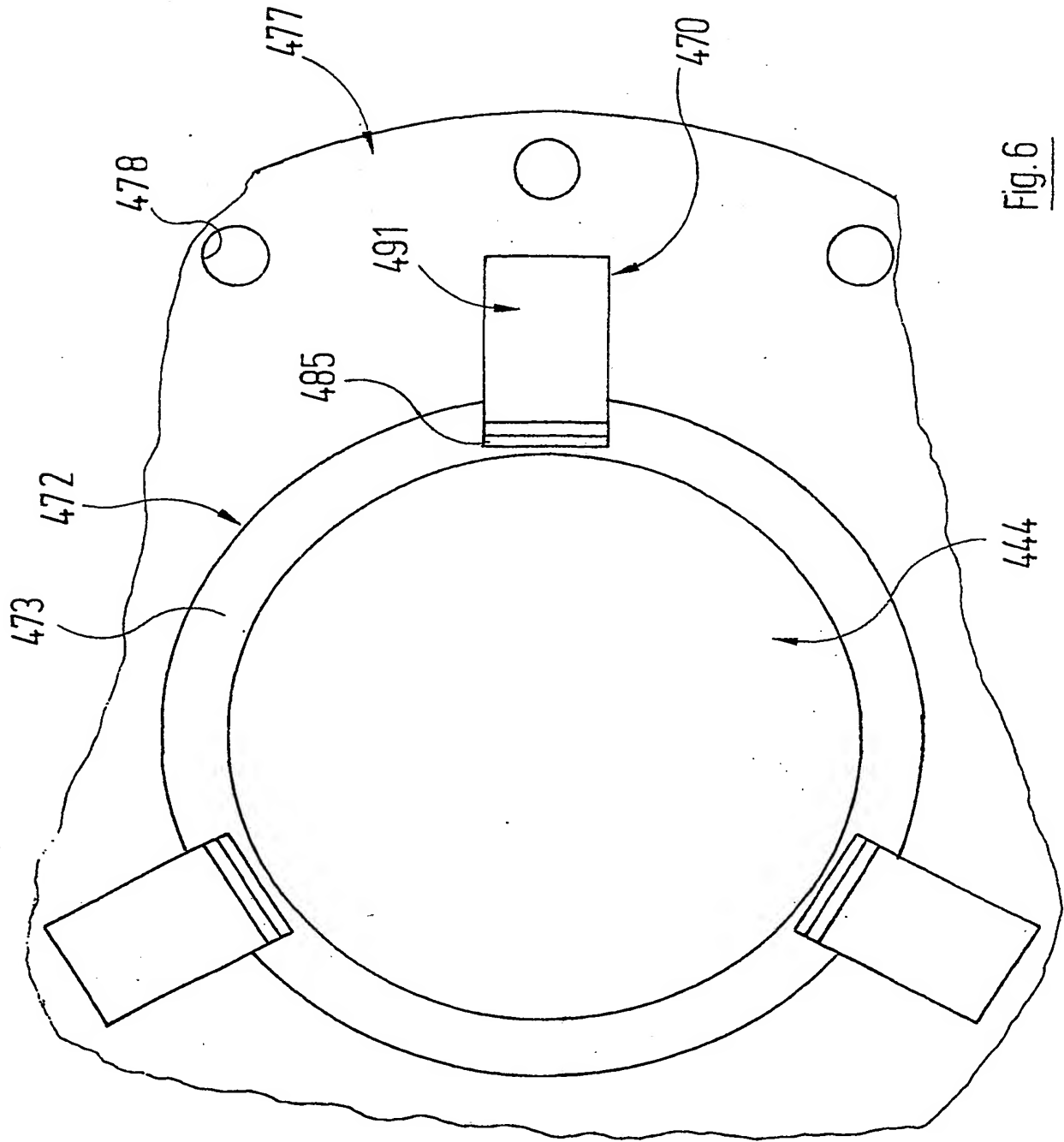


Fig. 6

7/12

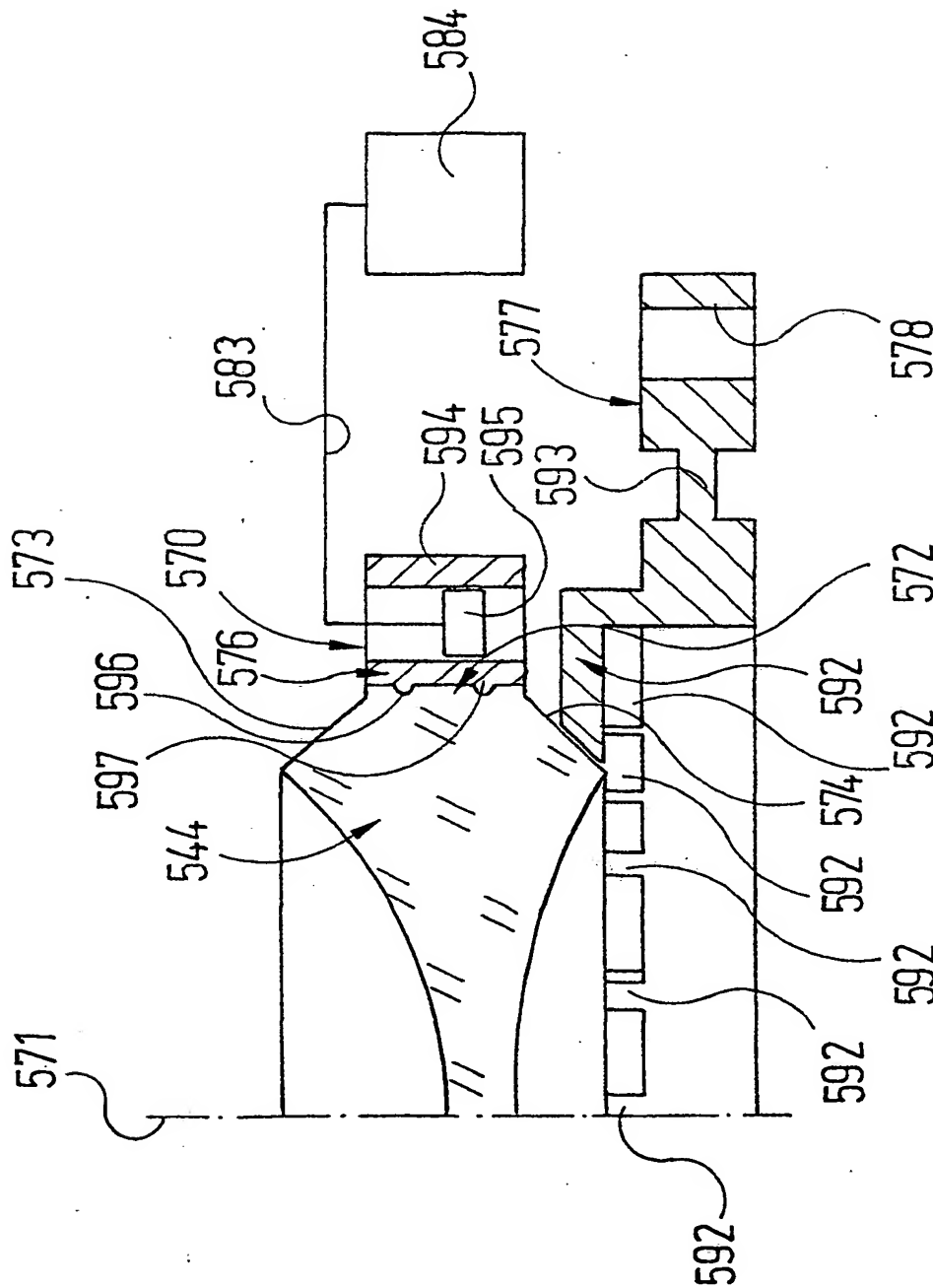


Fig. 7

8/12

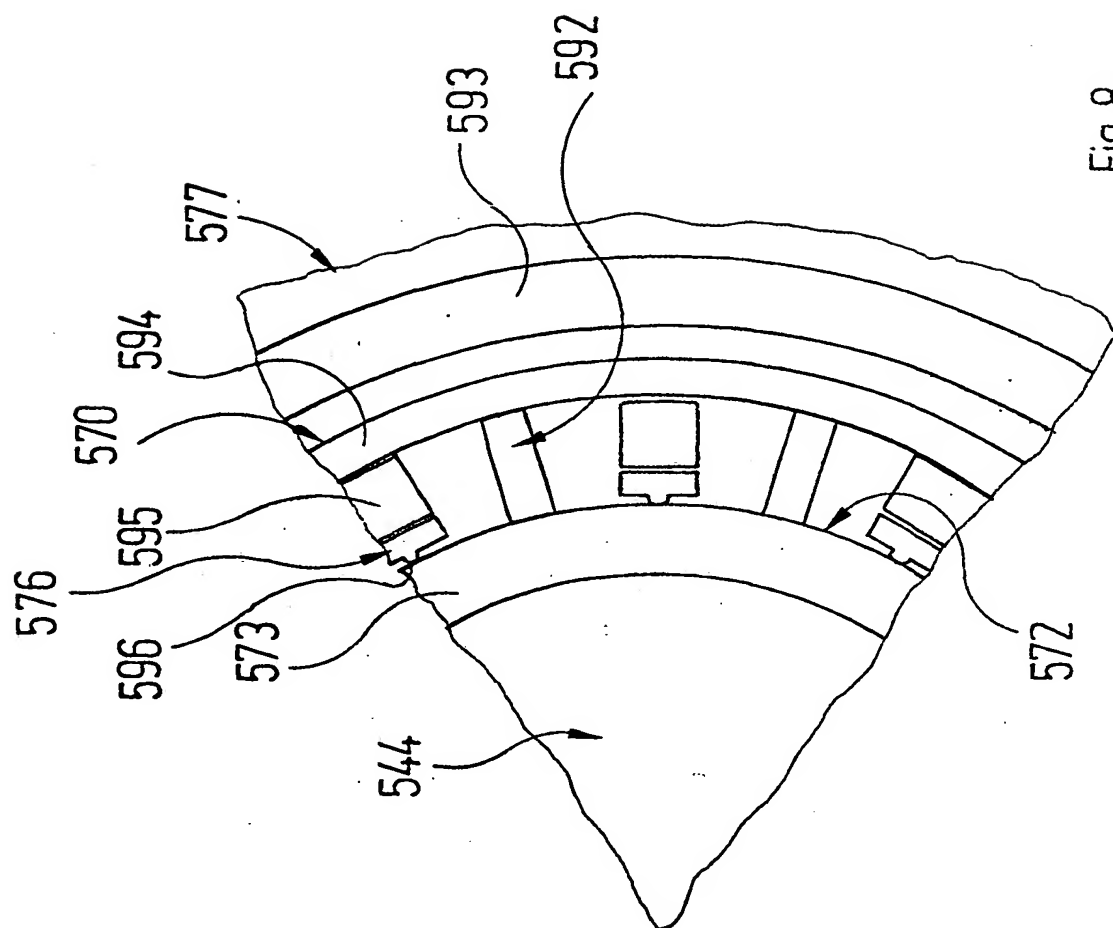


Fig. 8

9/12

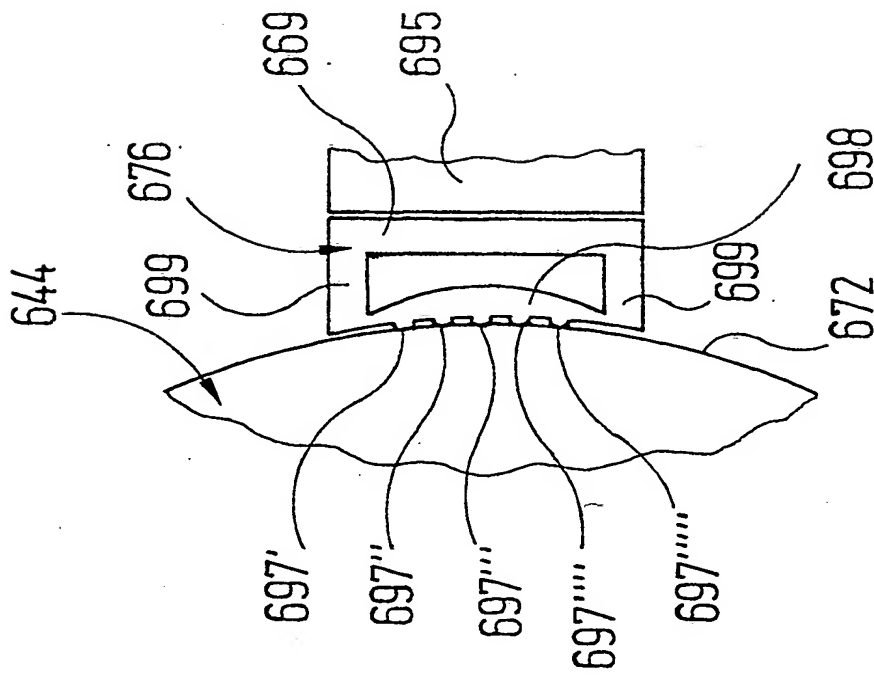
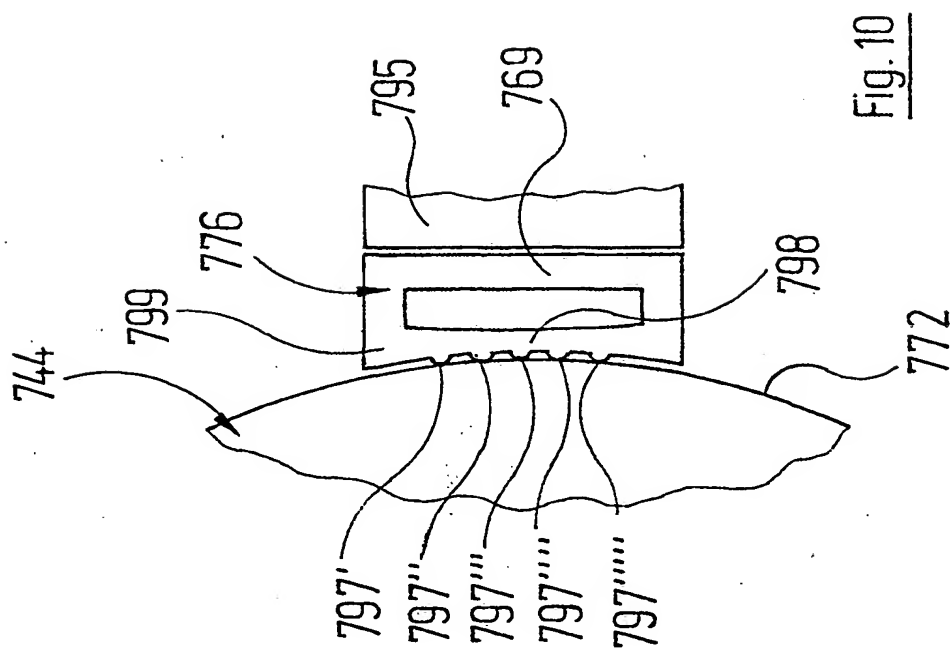


Fig. 9

10/12



11/12

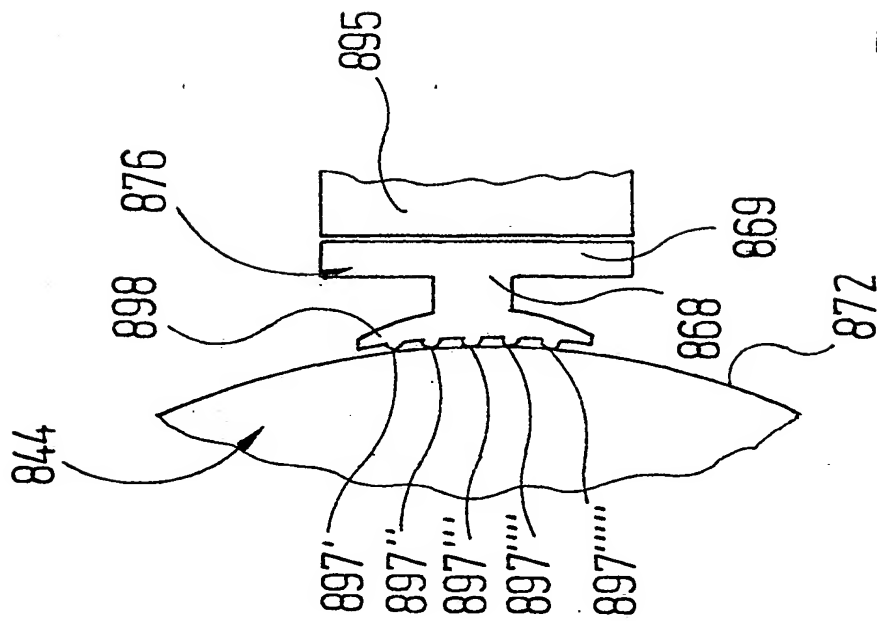


Fig. 11

12/12

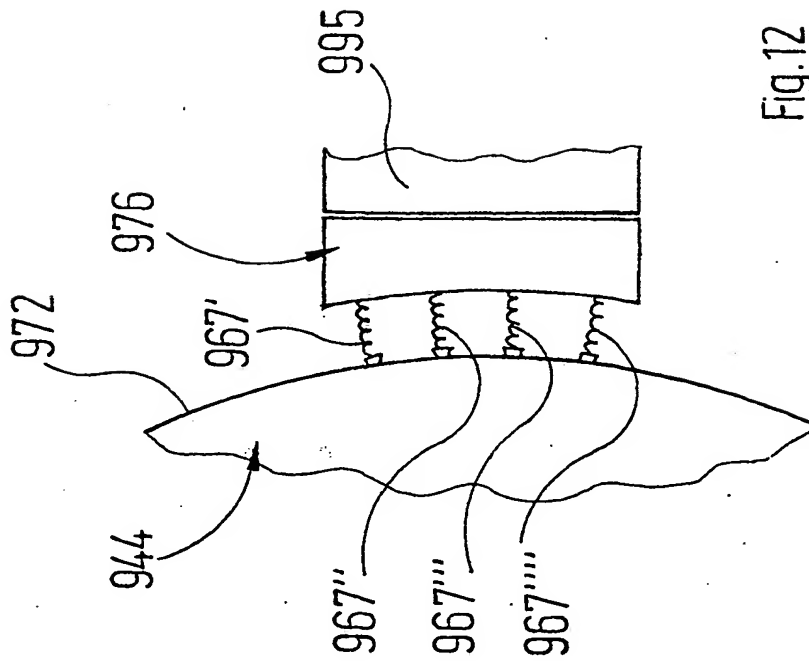


Fig. 12